

Low-Temperature  
Superconductivity is  
**WARMING UP**



# 초전도현상의 온도가 높아지고 있다

좋은 초전도체를 만드는 물질에 대한 기존의 지식에 의하면 붕화마그네슘은 아니다.  
그러나 절대온도 40도라는 상대적으로 높은 온도에서 초전도현상이 이 물질에서  
일어남으로 인하여 앞으로 이것에 대한 많은 응용 가능성을 보여주고 있다.

글 | Paul C. Canfield, Sergey L. Bud'ko

붕화마그네슘 와이어 조각의 연마된 단면은 이 와이어가 본질적으로 100%  
고밀도이며 빛을 다르게 반사하여 여러 가지 색깔로 보이는 작은 입자들로  
이루어져 있다는 사실을 보여준다. 이런 와이어들은 이 물질의 초전도성에  
관한 기초 연구에 유용하다. 사진의 와이어는 지름이 0.14mm이다.



뒀 뜰을 거닐다가 잘 알고 있다고 생각했던 구석에서 갑자기 금맥을 발견하는 것을 상상해보자. 혹은 Beverly Hillbillies에서 석유가 땅에서 솟아나기 시작할 때 Jed Clampett의 기분이 어땠을지 생각해보자. 2001년 초반 고체물리학계가 이와 유사한 믿기 어려운 정도의 흥분감에 잠겼는데, 바로 과학자들이 40 K 근처에서 저항 없이 전기가 흐르는  $\text{MgB}_2$  초전도체를 발표했던 것이다.

이 단순한 합성물은 1950년대에 연구되었지만 수십 년 동안 별로 흥미없다는 이유로 몇몇 실험실 선반에 방치되어 있었지, 누구도 이것의 숨겨진 막대한 가치에 대해 의문을 품지 않고 있었다. 40 K (-233°C)가 꽤 낮은 온도이지만 금속으로 된 합성물 (연구와 산업용으로 광범위하게 사용되고 있는 니오븀 기반 합금의 경우 약

Imagine walking around in your backyard and suddenly discovering a vein of gold in a corner you thought you knew well. Or imagine how Jed Clampett of the Beverly Hillbillies felt when oil started bubbling up through the ground. A similar sensation of incredulous excitement swept over the solid-state physics community in the early weeks of 2001, when researchers announced that magnesium diboride ( $\text{MgB}_2$ ) superconducts - conducts electricity without resistance - at temperatures approaching 40 kelvins.

This simple compound had been studied in the 1950s and had been on the shelves in some laboratories for various mundane purposes for decades, with no one suspecting its enormously valuable hidden talent. Although 40 K (or -233 degrees Celsius) may sound rather low, it was nearly double the record for compounds made of metals (about 23 K for niobium-based alloys, which are widely used in research and industry). A transition temperature that high can be achieved by technologies that cost much less than those needed to bring about superconductivity in the niobium alloys. Possible applications include superconducting magnets and power lines.

Unlike high-temperature superconductors (copper oxide materials that superconduct at temperatures as high as 130 K),  $\text{MgB}_2$  seems to be a traditional superconductor, albeit a novel variant. In their decades-long quest for superconductors with ever higher transition temperatures, physicists had developed rules of thumb regarding what kind of combinations of elements

#### OVERVIEW 봉화마그네슘

- 2001년도에 과학자들은 겉으로 보기에는 평범한 합성된 봉화마그네슘이 약 40 K 이하의 온도에서 초전도성을 가진다는 사실을 발견하였는데, 이 온도는 비슷한 다른 초전도체가 초전도성을 가질때와 비교하면 거의 2배에 가까운 온도이다. 이 초전도체의 실용적인 작동온도는 약 20~30 K이다.
- 이 온도는 액체 네온이나 수소, 혹은 밀폐 순환 냉동기를 이용하면 만들 수 있는데, 이것들 모두 산업용으로 4 K 정도의 온도에서 널리 쓰이는 니오븀 합금에 필요한 액화 헬륨 냉각 방식에 비해 훨씬 더 싸고 문제점이 적은 방법이다.
- 탄소나 혹은 다른 불순물들을 첨가할 때 봉화마그네슘은 자기장이 걸려 있는 상황이나 전류가 흐르고 있는 상황에서 초전도성을 유지하는 능력이 니오븀 합금과 비교하면 대략 비슷하거나 더 뛰어나다.
- 초전도 자석이나 전력선, 혹은 정밀 자기장 측정기에 이 봉화마그네슘이 활용될 가능성이 있다.



23 K)에 비하면 거의 두 배의 수치이다. 니오븀 합금의 초전도현상을 일으키는 데 필요한 것보다 훨씬 비용이 적게 드는 기술로 그만큼의 높은 전이온도를 얻을 수 있다. 응용 가능한 예는 초전도자석과 전력선이다.

고온초전도체 (130K와 같은 높은 온도에서 초전도 현상을 보이는 구리산화물)와는 달리  $MgB_2$ 는 다른, 새로운 종류이긴 하지만 고전적인 초전도체인 것으로 보인다. 수십 년에 걸쳐서 더 높은 전이온도를 갖는 초전도체를 찾는 과정에서 물리학자들은 어떤 종류의 원소들을 결합해 볼 것인가에 대해 엄지손가락 법칙을 개발해냈다. 덧붙이자면 많은 물리학자들은 고전적인 초전도체가 가능한 최고전이온도가 23 K 근처일 것으로 생각했다. 그런데 놀랍게도  $MgB_2$ 는 이러한 법칙에 따르지 않고 더 높은 온도에 대한 장벽을 무너뜨렸다.

$MgB_2$ 를 이해하는 속도는 놀랍게 증가했다. Tokyo에 위치한 Aoyama Gakuin 대학의 Jun Akimitsu는 2001년 1월 중순에 있었던 모임에서 그 발견을 발표했다. 두 달이 지나기도 전에 미국물리학회 연례 봄 회의에서 이 주제에 대해 약 100개의 2분짜리 발표가 있었고, 70개 이상의 연구논문이 "arxiv.org의 preprint archive"에 전자문서로 게재되었다. 이렇게 왕성한 활동을 하게 된 데는 몇 가지 이유가 있다. 첫째로, 방법을 알면 상대적으로 순수한  $MgB_2$ 를 만드는 것은 꽤 단순하다. 둘째, 2001년에 응집물질물리학회가 어느 때보다 더 인터넷으로 서로 연결되어 있었다. 이 두 가지 요인이 높은 전이온도를 갖는 새롭고 단순한 초전도체에 대한 기대와 결합하여 커다란 지적 쇄임을 갖게 되었다.

### 발견의 확인

처음에 Akimitsu의 발표소식은 구두와 전자메일로 알려졌다. 연구논문이나 전자문서로 된 초안도 입수할 수 없었다. 발표가 있는 지 며칠 후에 그 소식이 우리 그룹에 전달되었을 때 우리는 일련의 질문을 하게 되었다. 고순도의 이 고체조각을 만들 수 있을까? (선반에 있는  $MgB_2$ 는 그렇게 순수한 파우더가 아니다.) 40K 근처에서 과연 초전도현상이 일어날까? (예외적으로 높은 전이온도를 가지고 있고 다른 연구자들이 반복할 수

to try. In addition, many suspected that 23 K was close to the maximum transition temperature possible for a traditional superconductor. To their great surprise,  $MgB_2$  defied these rules and blew away the barrier to higher temperatures.

The speed with which understanding of  $MgB_2$  grew was absolutely amazing. Jun Akimitsu of Aoyama Gakuin University in Tokyo announced the discovery at a meeting in mid-January 2001. Just two months later about 100 two-minute talks on the topic were presented at the American Physical Society's annual March meeting, and more than 70 research papers had been electronically posted on the arxiv.org preprint archive. This burst of activity happened for a few reasons. First, once you figure out how, it is fairly simple to make relatively pure  $MgB_2$ . Second, in 2001 the condensed-matter physics community was more wired together by the Internet than ever before. These two ingredients, combined with the promise of a new, simple superconductor with a high transition temperature, formed an explosive intellectual mixture.

### Confirming the Discovery

at first, news of Akimitsu's announcement spread only by word of mouth and e-mail. No research paper or electronic draft was available. When the news reached our group a few days after the meeting, we asked a series of questions: Can we make high-purity, solid pieces of this stuff? (On the shelf,  $MgB_2$  is a not so pure powder.) Does it really superconduct near 40 K? (There had been almost two decades' worth of USOs, or "unidentified superconducting objects" - compounds reported to have exceptionally high transition temperatures that other researchers could not replicate.) If  $MgB_2$  does superconduct, can we uncover the mechanism of its superconductivity? And finally, can we delineate some of this compound's basic properties? Happily for one and all, the answer to each of these



없었던 합성물로 거의 20년간 “미확인 초전도체” (USO)로서의 가치가 있는 것이다.  $MgB_2$ 가 초전도현상을 보인다면 그것의 초전도 메커니즘을 설명해낼 수 있을 것인가? 그리고 마지막으로 이 합성물의 몇몇 기본적인 성질을 묘사할 수 있을까? 다행스럽게도 이 모든 물음에 대한 답은 예스였다.

Akimitsu가 발견했다는 소문으로 우리와 다른 연구그룹은 급박하면서도 유용한 시간을 갖게 되었다. 우리 팀은 금속합성물의 물리적 특성을 연구하는 데 집중하고 있었는데 그 소식을 듣자마자 기존에 실험하던 전기로를 모두 비우고  $MgB_2$ 를 만들려고 노력하기 시작했다.

합성물을 만드는 것은 처음에는 어려운 일이었다. 그것은 두 가지나 그 이상의 금속원소로 이루어진 금속간 (intermetallic) 합성물의 예이다. 금속간 합성물을 만드는 가장 단순한 방법은 원소들을 함께 녹이기만 하면 되는데 이 경우는 불가능했다. 왜냐하면 두 원소가 매우 다른 녹는 점, 마그네슘은  $650^{\circ}C$ 이고 보론은  $2000^{\circ}C$ 보다 높은 녹는점을 가지고 있기 때문이다. 마그네슘은  $1100^{\circ}C$  바로 위에서 끓기 때문에 마그네슘은 합성물이 형성되기 전에 증발해버린다. 다시 말해서 보통 마그네슘은 빨리 성장해서 날아가 버린다.

그렇지만 마그네슘이 증발하는 것은 다른 방법을 제시했다. 마그네슘 조각과 소량의 가루 보론을 불활성의 탄탈륨 용기에 넣어 봉하고 마그네슘을 녹게 하기에는 충분하지만 끓지 않도록 하는 온도 (가령,  $950^{\circ}C$ )에 놓아두었다. 마그네슘은 상대적으로 높은 증기압을 가지고 있는데 마그네슘 증기의 3분의 1이  $950^{\circ}C$ 에서 액체 금속과 평형을 유지한다. 우리가 한 기대는 이 압축 증기가 고체 보론 속으로 확산해 들어가서  $MgB_2$  펠렛을 만들어내는 것이다. 확실하면서도 충분히 2시간의 이 과정을 거쳐 모래덩어리와 같은 덜 조밀하게 소결된 펠렛 형태로 된 아주 고순도의  $MgB_2$ 를 만들어냈다. 그 소문을 들은지 3일만에 이 펠렛을 만들고 40 K 근처에서 초전도현상을 확인할 수 있었다.

$MgB_2$ 를 제대로 만든 것인지 그리고 그것이 초전도체인지를 확인하기 위해서 다음의 중요한 질문을 해야 했다. 그것의 거동이 BCS이론 (세명의 발견자의 성의

questions was yes.

The rumor of Akimitsu's discovery started a frantic and wonderful time for us and for other research groups. Our team specializes in studying the physical properties of metallic compounds, so as soon as we heard about the report, we emptied all of our furnaces of existing experiments and started trying to produce  $MgB_2$ .

Making the compound was a tricky business initially. It is an example of an intermetallic compound, one made of two or more metallic elements. The simplest way of making intermetallic compounds - by just melting the elements together - was not possible in this case, because the two elements have very different melting points:  $650^{\circ}C$  for magnesium and higher than  $2,000^{\circ}C$  for boron. Because magnesium boils at just over  $1,100^{\circ}C$ , the magnesium would evaporate before the compound could form, or, in the vernacular, the magnesium would grow legs and walk away.

But the vaporization of magnesium suggested an alternative method: we could seal a piece of magnesium and some powdered boron inside a tantalum vessel, which is inert, and subject them to a temperature high enough to melt but not to boil the magnesium (say,  $950^{\circ}C$ ). Magnesium has a relatively high vapor pressure - indeed, one third of an atmosphere of magnesium vapor exists in equilibrium with the liquid metal at  $950^{\circ}C$ . We expected that this dense vapor would diffuse into the solid boron, producing pellets of  $MgB_2$ . Sure enough, we found that in as little as two hours this process produced very high purity  $MgB_2$  in the form of a loosely sintered pellet (like sandstone). Within three days of hearing the rumors, we had made these pellets and were able to confirm superconductivity at near 40 K.

Having figured out how to make  $MgB_2$  and confirmed that it is a superconductor, we asked the next burning question: Was it an old-fashioned superconductor whose behavior could be explained by a long-established theory



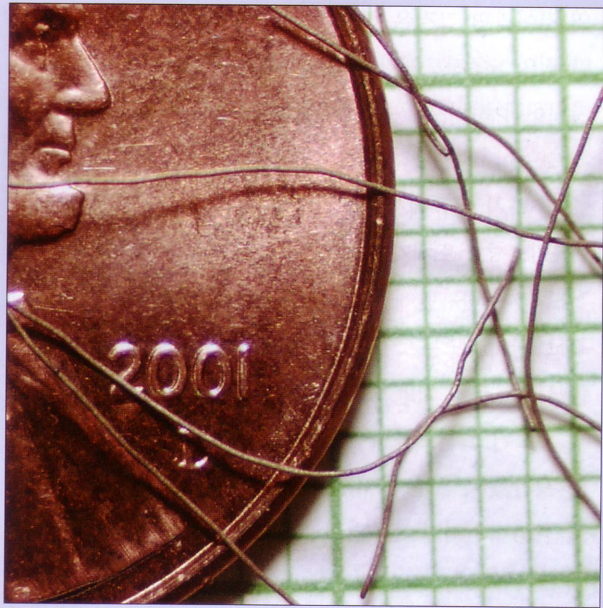
## 와이어 만들기

MgB<sub>2</sub>의 초전도성이 발표된 지 2주 내에 우리는 이 놀라운 초전도체의 와이어 조각을 만드는 방법에 대해 고안해 냈다. MgB<sub>2</sub>는 섭씨 약 1,000도에서 수 시간 내에 마그네슘 증기를 붕소와 반응시켜 만들 수 있는데, 붕소는 주위 환경에서 마그네슘 수증기를 빨아들이고 그 과정에서 붕소는 극적으로 부풀어 오르며 MgB<sub>2</sub>가 된다. 매우 습한 공기 중에 있는 마른 스폰지가 그 수증기를 빨아들이고 있다고 상상해 보자. 이 과정은 수 백미터 길이로 살 수 있는 붕소 섬유에도 적용되는데, 이 붕소섬유는 지름 0.1~0.3mm의 필라멘트용으로 쓰여 왔다.

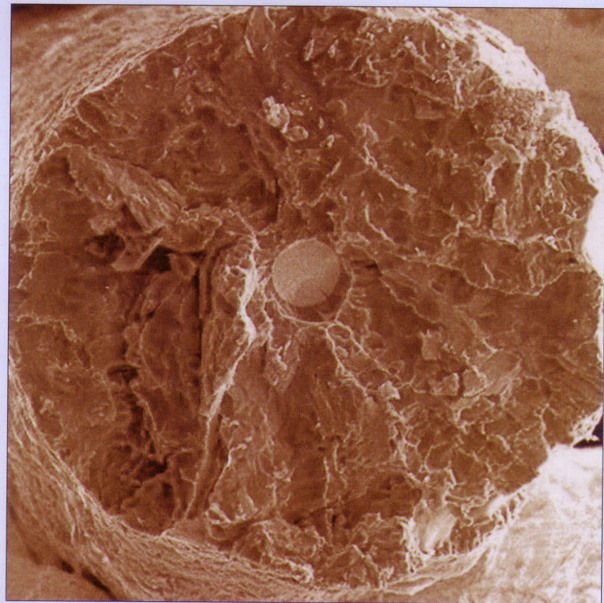
이런 종류의 와이어 조각은 MgB<sub>2</sub>의 본질적인 물리적 특성들을 측정하는 기초적 연구에 매우 유용하다. 이러한 와이어 조각들이 실제로 활용되려면 구조적 지지를 위해 전도성을 가지고 있는 연성의 덮개가 필요한데, 초전도성이 사라질 경우 이것을 통해서도 전류가 흘러 MgB<sub>2</sub>의 온도가 크게 올라 망가지는 것을 방지하게 된다. 적절한 덮개는 아직까지 만들지 못하고 있다.

더 일반적으로 많이 쓰이는 와이어 합성에는 “튜브 속 분말”이라는 방법이 있다. 이 방법은 튜브 안에 파우더 형태의 마그네슘과 붕소, 혹은 분말 형태의 MgB<sub>2</sub>를 붓고 튜브를 와이어 모양으로 늘리고 나서 고체구조를 갖게 만들기 위해 그 와이어 형태로 잡아빼고 반응을 시키거나 와이어를 가열냉각시키는 것이다. 이 방법으로 수십 미터에서 수백 미터에 이르는 연구 시료를 만들어냈다.

MgB<sub>2</sub>가 비교적 새로운 초전도체인데도 불구하고, 기업들은 이를 알아차리고 그것을 상업화 시키려고 하고 있다. 예를 들자면 Diboride Conductors나 Hyper Tech Research 같이 작은 회사들은 MgB<sub>2</sub> 와이어와 특수한 물질들을 만들고 그 성능을 향상 시키는데 초점을 맞추고 있고, 붕소 필라멘트를 만드는데 전문기술을 가지고 있는 Specialty Material 같은 큰 회사도 MgB<sub>2</sub> 상용화에 뛰어들고 있다.



와이어는 마그네슘 수증기와 붕소 필라멘트를 반응시켜 만들었다.



붕화마그네슘 와이어 조각의 단면은 중앙에 있는 지름이 0.015mm의 붕소화 텅스텐 심을 보여준다.



첫글자를 따서 붙임)이라 불리는 오랫동안 구축된 이론으로 설명할 수 있는 기존 형태의 초전도체인가 아니면 다른 형태의 경우인가[93쪽 상자글 참고]? 다른 형태의 것이라면 그것은 심오한 과학적 발견일 것이다. 반면에 BCS 초전도체라면 특이하게 높은 전이온도가 설명되어야 하나, 이 물질을 응용에 사용할 수 있으리라는 전망이 더 고무적인 것이다.

몇 가지 이유에서 어떤 연구자들은  $MgB_2$ 가 표준적인 BCS 초전도체가 아니라고 생각했다. 첫째 고온 초전도체가 1986년에 발견된 지 20년이 지나도록 그들의 최고 전이온도는 20K 근처에 머물러 있었던 것이다. 이 사실로부터 어떤 이론가들은 BCS 규칙을 따르는 합성물로 된 초전도체의 가능한 최고 온도가 30K일 거라고 제안했다. 고온 구리 산화물 초전도체는 그 한계를 훨씬 넘어서지만 이것을 BCS 초전도체라고는 생각하지 않는다.

둘째  $MgB_2$ 의 상대적으로 높은 전이온도 혹은 임계온도 ( $T_c$ )는 보다 높은  $T_c$ 를 갖는 금속간 합성물을 찾아내는 오래된 경험법칙, 즉 초전도 상태로의 상전이에 참여하는 전자가 많을수록 전이온도가 높아진다는 것을 깨뜨리는 것이다. 그러나 마그네슘이나 보론 어느 것도  $MgB_2$ 에 특별하게 많은 전자를 가져다주지 못한다.

매우 직접적인 실험 테스트로 어떤 초전도체가 BCS 이론을 따르는 지 알 수 있다. 이 이론에서는 격자 진동이 핵심 역할을 하고 있다. 결정격자에서 무거운 양이온이 강한 스프링 (화학결합)에 의해 고정되어있다고 생각해보자. 열에 의한 들뜸은 특성 진동수에서 개개 이온의 진동으로 나타난다. BCS이론이 예측하는 바는 초전도체의 전이온도가 격자 진동의 진동수에 비례하는 것이다. 와인 잔이나 기타 줄 같은 일상적인 물체의 경우와 같이, 낮은 질량의 물질로 이루어진 물체는 높은 질량의 물질로 이루어진 다른 동일한 물체보다 더 높은 특성 진동수를 가진다. 마그네슘이나 보론의 다른 동위원소를 사용해서 다른 질량을 갖는 원자로 구성된  $MgB_2$ 를 만들 수 있으며 이것은 격자 진동수를 변화시켜 결과적으로  $T_c$ 를 특정한 방식으로 변화시킨다.

보론은 두 개의 안정하고 자연적으로 생기는 동위원

called BCS theory (from the initials of its three discoverers' last names) or an example of a more exotic type [see box on page 93]? If it was an exotic type, that would be a profound scientific discovery. On the other hand, if it was a conventional BCS superconductor, the exceptionally high transition temperature would demand an explanation, but the prospects for using the material in applications would be more encouraging.

For several reasons, some researchers thought that  $MgB_2$  was not a standard BCS superconductor. First, before high-temperature superconductors were discovered in 1986, two decades had gone by with the highest transition temperature stuck at around 20 K. This fact led some theorists to suggest that about 30 K was the maximum temperature possible for superconductivity in compounds that obey BCS rules. The high-temperature copper oxide superconductors far exceeded that limit, but they are not thought to be BCS superconductors.

Second,  $MgB_2$ 's relatively high transition temperature, or critical temperature ( $T_c$ ), violated one of the old rules of thumb in the search for intermetallic compounds having a higher  $T_c$ : the more electrons that could participate in the phase transition to the superconducting state, the higher the transition temperature would be. Neither magnesium nor boron brought particularly many electrons to  $MgB_2$ .

A very direct experimental test can tell whether a superconductor is following the BCS theory. A key role in the theory is played by lattice vibrations. Imagine that the heavy positive ions of the crystal lattice are held in place by strong springs (the chemical bonds). Excitations such as heat manifest as vibrations of the ions at characteristic frequencies. BCS theory predicts that the transition temperature of a superconductor is proportional to the frequency of its lattice vibrations. As is the case with everyday objects such as wineglasses or guitar strings, objects made from lower-mass materials have higher characteristic frequencies than otherwise identical objects



## 초전도체의 역사

1911년에 Heike Kamerlingh Onnes은 액화 헬륨을 이용한 저온에서의 금속의 전기적 성질에 대해 연구를 하는 도중에 초전도성을 발견하였다. 수은을 약 4.2K의 온도로 냉각시켰을 때 갑자기 모든 전기저항이 사라진다는 사실은 모든 사람들을 놀라게 하였다. 초전도현상이 일어나는 이 경계온도는 임계온도 혹은  $T_c$ 로 알려져 있다. 초전도성에 관한 연구가 시작된 지 처음 50년간 더 높은 임계온도를 가지는 다른 초전도 물질들이 하나하나 발견되어져왔다. 발견된 모든 초전도체들은 순수한 금속 원소들이거나 혹은 금속간화합물(둘 이상의 금속 원소들로 이루어진)이었다. 그러나 1960년대부터 1980년대 중반에 이를 때까지 새로운  $T_c$ 의 발견은 20K부근에서 멈춰버린 듯 보였다.

1986년에 구리 산화물을 기본으로 한 화합물들의 많은 종류에서 고온 초전도체 현상이 발견되면서 새로운 국면을 맞게 되었다. 이 발견이 있고나서 처음 몇 년 동안에는 Tc값은 수은-바리움-칼슘-구리 산화물에서 약 130 K의 값을 가지면서 엄청난 상승을 보였다. 이 시기는 매우 흥분되는 시간들이었지만, 동시에 우리는 왜 초전도현상이 일어나는가를 설명하는 이론인 BSC 이론[93쪽 상자글 참고]이 더 이상은 물질에서 저항이 사라지는 이유를 설명하지 못한다는 사실을 깨닫게 되었다. 거의 20년에 걸친 노력에도 불구하고 아직도 우리는 어떻게 그리고 왜 구리 산화 화합물들이 초전도성질을 갖게 되는지 명확하게 설명하는 이론을

찾지 못했다.

또한 이들 화합물은 수많은 물리학적 난제들을 우리에게 던져 주었다. 우선 이 화합물들은 고순도나 또는 단일 크리스탈 구조로 만들기가 어려워 그들의 기본적인 물리적 성질들을 측정하는 데 어려움이 있다. 게다가 와이어를 합성하는 것도 쉽지 않다. 금속 간 초전도체와는 다르게, 이 산화물들 중의 한 조각을 구성하는 개개의 작은 입자들은 공학적으로 쓸모 있는 성질을 가진 와이어를 생성하기 위해서는 서로서로 일렬로 정렬이 되어야만 한다. 이 문제들로 인해 과학기술자들은 20K 이상의 임계온도를 가지고 있음과 동시에 좀 더 쉬운 어떤 물질적 성질을 가지고 있는 금속 간초전도체를 원하게 만들었다.

새 천년이 막 시작된 무렵에 여러 가지 온도의 초전도 상태를 만들어 내는 방법이 보다 편해지고 초전도 상태가 여러 방면으로 이용되었다. 산화물에서는 보통 초전도현상이 77K 부근에서 일어나는데, 이 온도는 액체질소에 담금으로써 쉽게 얻어진다. 액화 헬륨으로 4K까지 온도를 내린 니오븀-주석같이 좀 오래된 금속 간화합물들은 연구용과 의학용 자석으로 이용된다.

2001년에 단순한 금속간 화합물인 붕화마그네슘이 다른 금속간 화합물들에 비해 거의 두배에 가까운 온도인 40K에서 초전도 현상을 보인다는 발견은 거의 정확히 의사가 (이 경우에는 공학자가) 원했던 것과 일치했다.





소인 보론10과 보론11을 가지고 있다. BCS모델의 가장 단순한 예측은 순수한 보론10과 보론11로 이루어진 두 개의  $MgB_2$  시료에 대해 Tc가 0.85K만큼 상대적으로 차이가 나야한다는 것이다. 처음으로 소결한  $MgB_2$  펠렛으로 1K의 이동이 일어나는 것을 발견했다. Tc의 이동이 단순한 예측치보다 약간 크다는 사실은 BCS이론에 의해 수용될 수 있으며 초전도체에서는 마그네슘의 진동보다 보론의 진동이 보다 중요하다는 것을 알려준다[94쪽 상자글 참고].

예상했던 0.85K에 가까운 수치가 보여주는 바는  $MgB_2$ 가 다른 것보다 훨씬 높은 전이온도를 가지는 극단적인 보기이기는 하지만 거의 BCS 초전도체와 다름 없다는 것이다. BCS초전도체가 30K의 상한선을 갖는다는 이론적인 예측은 유효하지 않은 것으로 보인다. 이것은 좋은 소식인데 왜냐하면 표준적인 금속간 BCS 초전도체는 일하기가 훨씬 쉽고 구리산화물을 기반으로 한 초전도체보다 훨씬 쉽게 유용한 와이어를 만들 수 있기 때문이다. 보론 필라멘트를 마그네슘 증기에 단순히 노출시킴으로써  $MgB_2$  와이어를 만들 수 있다는 것을 갑자기 알기 시작했다. 그와 같은 와이어는 많은 측정과 자석과 같은 응용에 있어서 소결된 펠렛보다 훨씬 유용하다.

**AUTHORS** 폴 캔필드(Paul C. Canfield),  
세르게이 버드고(Sergey L. Bud'ko)

이들은 아이오아 주의 에임즈 연구소에서 일한다. 캔필드는 또한 아이오와주립대학교의 물리학 및 천문학과 교수이기도 하다. 그의 연구는 새로운 물질들과 현상에 (궁극적으로 금속 혼합물의 저온에서의 전기적 자기적 상태에 초점을 둔) 관한 설계, 발견, 성장 그리고 특성들에 초점을 두고 있다. 버드고의 연구는 새로운 물질들의 열역학적, 자기적 그리고 수송 성질들에 관심을 두고 있는데, 금속과 반금속 물질의 양자 진동, 고압 및 강한 자기장 그리고 낮은 온도를 조합한 극한 상태에서 나타나는 물질들의 물리적인 속성들을 예로 들 수 있다. 저자들은 R. Wilke, D. Finnemore, C. Petrovic, G. Lapertot, M. Angst, R. Ribeiro 및 N. Anderson의 많은 협조에 감사한다. 그들의 연구는 Office of Basic Energy Sciences의 Director for Energy Research에 의해 지원 받았다.

made from higher-mass materials. By using a different isotope of magnesium or boron, we can make  $MgB_2$  out of atoms of different mass, which will alter the lattice vibration frequency, which in turn should alter Tc in a specific way.

Boron has two stable, naturally occurring isotopes: boron 10 and boron 11. The simplest prediction of the BCS model is that Tc should differ by 0.85 K for two samples of  $MgB_2$  made with pure boron 10 and boron 11. With our first sintered pellets of  $MgB_2$ , we discovered a shift of 1 K. The fact that the shift in Tc was a little larger than the simple prediction can be accommodated by BCS theory - it indicates that the boron vibrations are more important to the superconductivity than the magnesium vibrations [see box on page 94].

The closeness of this shift to the predicted 0.85 K revealed that  $MgB_2$  is most likely a BCS superconductor, albeit an extreme example that has a much higher transition temperature than any other. The predictions of an approximate 30 K upper limit to BCS superconductivity were apparently not valid. This was good news, because standard intermetallic BCS superconductors are much easier to work with and can form useful wires much more readily than copper oxide-based superconductors can. Indeed, it suddenly dawned on our group that we could form  $MgB_2$  wires by simply exposing boron filaments to magnesium vapor. Such wires are of greater use than sintered pellets for many measurements and for applications such as magnets.

### Uses of Superconductors

although it occurs only at very low temperatures, superconductivity has a wide variety of present-day uses, as well as potential future applications. Some of the most obvious derive from superconductors' ability to carry high currents with no energy losses or resistive heating. An example is superconducting magnets that can

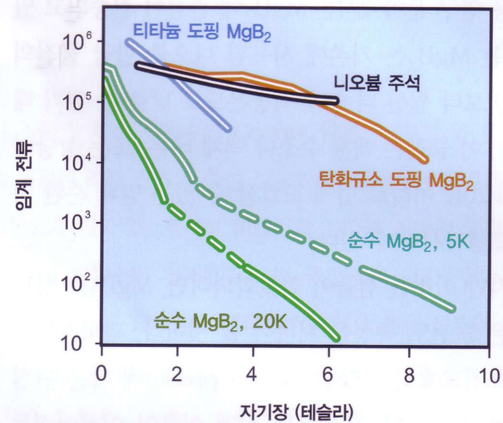
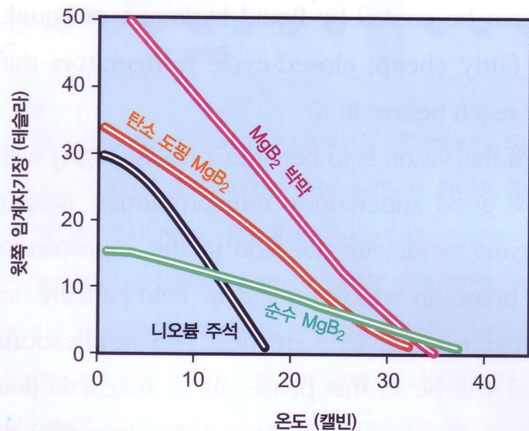


## 성능의 개선

전류가 흐를 때 자기장 내에서 초전도성을 유지하는 것은 매우 중요하다. 그림의 데이터는 혼합물을 도핑한 것이  $MgB_2$ 의 성능을 어떻게 개선했는지를 보여주는데 이는 산업적으로 선호되고 있는 니오븀 주석 (triniobium tin,  $Nb_3Sn$ )의 성능과 같거나 이를 초과한다. 왼쪽의 그래프는 탄소가 도핑된  $MgB_2$  선조각과 알려지지 않은 분량의 혼합물이 첨가된  $MgB_2$  박막이 모든 온도에서

$Nb_3Sn$ 보다 더 큰 윗쪽 임계자기장 (upper critical field)을 가진다는 것을 보여준다.

오른쪽 데이터(표시된 곳을 제외하고, 약 4 K에서 얻음)는 실리콘 탄화규소로 도핑된  $MgB_2$ 가  $Nb_3Sn$ 와 같은 수송한계전류를 갖는다는 것을 보여 주고 있으나 다른 종류들은 현저히 떨어진다. 점선들은 외삽에 의한 것이다.



### 초전도체의 사용

초전도 현상은 비록 낮은 온도에서 일어나지만, 초전도성은 미래에 이용될 수 있는 무한한 잠재력이 있을 뿐 아니라 현재에도 이용될 수 있는 폭넓은 다양성이 있다. 초전도체로부터 분명히 이용할 수 있는 점은 에너지의 손실이나 저항에 의한 열손실 없이 높은 전류를 흘려보낼 수 있는 능력에 있다. 예를 들어, 초전도 자석은 20T보다 더 높은 자기장을 만들어 낼 수 있다. (이것은 전형적인 냉장고 자석의 500배에 해당한다.) 이처럼 저온 초전도 자석은 연구소나 병원에서 인체를 형상화하는 자기적인 공명 현상에도 사용된다. 니오븀( $Nb$ ) 합금을 통해 만들어진 이러한 자석의 수요는 점점 증가하고 있다.

제안된 또 다른 고전류 응용은 비초전도체 송전선보다 훨씬 더 높은 전류밀도를 송전할 수 있는 무손실 송전선이다. 현재까지 과학자들은 액체 질소를 사용하여 70K 가까이 냉각시킨 몇 가지 구리 산화물 초전도체로

produce magnetic fields in excess of 20 tesla (about 500 times stronger than a typical refrigerator magnet). Low-temperature superconducting magnets such as these (and less strong ones) are used in labs and in magnetic resonance imaging machines in hospitals. Sales of these magnets, crafted from niobium-based compounds and alloys, continue to grow.

Another high-current application that has been proposed is lossless power transmission lines, which can carry much higher current densities than nonsuperconducting ones. To date, researchers have successfully tested several copper oxide-based prototypes that have been cooled to near 70 K with liquid nitrogen.

Generally speaking, to act as superconductors in practical applications, compounds need to be cooled substantially below their  $T_c$ , to about 0.5 to 0.7  $T_c$ ,



실험적 성공을 거두었다.

일반적으로 실제 이용을 위해 초전도체로서의 역할을 하기 위해서는 그 물질은 대략  $0.5 \sim 0.7T_c$  이하로  $T_c$ 를 충분히 낮춰야만 한다. 왜냐하면 높은 전류나 강한 자기장은  $T_c$  근처에서 초전도체를 파괴하기 때문이다. 이는 20K 정도의  $T_c$ 의 경우는 작동온도는 10K 정도인데, 이를 위하여 초전도체를 액체헬륨으로 냉각하여야 하는데 이는 비용도 많이 들고 다소 어려운 방식이기도 하다.

응용 연구 분야에서는  $MgB_2$ 에 관심이 집중되고 있다. 이는  $MgB_2$ 는 기존에 사용된 니오븀 합금 물질의 낮은  $T_c$ 보다 훨씬 더 쉽게 작동온도로 낮출 수 있기 때문이다. 이 물질은 액체 수소나 액체 네온, 또는 상당히 값싸게 20K 이하로 쉽게 도달할 수 있는 밀폐 순환 냉각기로 냉각시킬 수 있다.

하지만 이러한 점들이 현실화하려면,  $MgB_2$ 는 상당히 좋은 초전도 특성을 지녀야 할 것이다. 과학자들은 특히 초전도체의 혼합상 (mixed phase)에 많은 관심을 기울이고 있다. 대부분의 실제 이용이 이루어지는 이 상에서 자기장은 초전도성을 부분적으로 파괴시킨다. 약한 자기장에서는 이러한 혼합상이 만들어지지 않고 초전도체는 내부로부터 약한 자기장을 차단하여 초전도성을 그대로 유지한다. 하지만 중간 영역 자기장에서는 vortex라 불리는 작은 튜브의 자기흐름 형태로 자기장이 그 물질에 침투하게 된다. 이 튜브의 안쪽은 초전도성이 없지만, 바깥쪽은 초전도성이 유지된다. 그렇지만 이 혼합상은 초전도체의 유용한 특성을 그대로 보여준다. 초전도체에 가해지는 자기장의 크기가 증가함에 따라서 자기흐름 튜브가 차지하는 비율은 튜브가 초전도체를 완전히 감싸고 전체적으로 초전도 현상을 잃게 될 때까지 증가한다. 초전도성을 잃게 되는 자기장의 세기는 “윗쪽 임계 자기장”이라 불리고 이는 초전도체가 얼마나 응용성이 있는지를 결정하는 주요한 특성이기도 하다.

대부분의 초전도체의 실제 이용은 중간 정도의 자기장 (쓸모 있을 만큼 충분히 강하지만 초전도성을 파괴할 만큼은 아닌)에서 이루어질 것이므로 목표는 초전도 혼합상이 유지되는 온도와 자기장 영역을 최대화하는

because large electric currents or strong magnetic fields destroy the superconductivity closer to  $T_c$ . Consequently, a  $T_c$  of 20 K may imply an operating temperature of 10 K, which means that the superconductor has to be chilled by liquid helium, a costly and somewhat difficult option.

The applied research community is interested in  $MgB_2$  because this material can be cooled to viable operating temperatures more easily than the lower- $T_c$  niobium-based alloys and compounds that are employed today.  $MgB_2$  can be cooled by liquid hydrogen or liquid neon or by fairly cheap, closed-cycle refrigerators that can readily reach below 20 K.

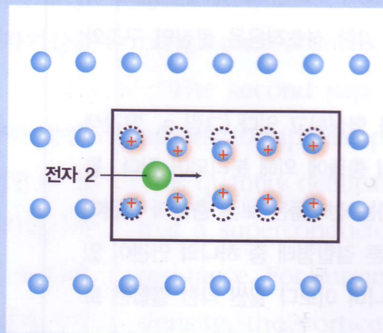
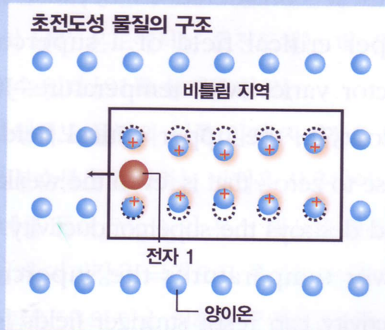
But if this vision is to become a reality,  $MgB_2$  will need to have good superconducting properties. Researchers are paying particular attention to the superconductor's mixed phase, in which a magnetic field partially destroys the superconductivity - in most real applications, the material will be in this phase. Weak magnetic fields do not produce the mixed state; the superconductor excludes such fields from its interior and remains superconducting. At intermediate fields, however, the material allows the magnetic field to penetrate in the form of small tubes of magnetic flux known as vortices. The insides of these tubes are nonsuperconducting, but outside of them the material remains superconducting.

This mixed phase still manifests many of superconductivity's useful characteristics. As the strength of the applied magnetic field increases, the percentage of the material occupied by the flux tubes increases until they overlap fully, at which point the whole material is nonsuperconducting. The field strength at which superconductivity is lost is referred to as the upper critical field and is a key property that determines how useful a superconductor will be in practice.

Most applications will involve intermediate fields (the field is strong enough to be useful but not so strong as to destroy superconductivity altogether), so the goal becomes maximizing the range of temperatures and



## BCS 이론의 예측들



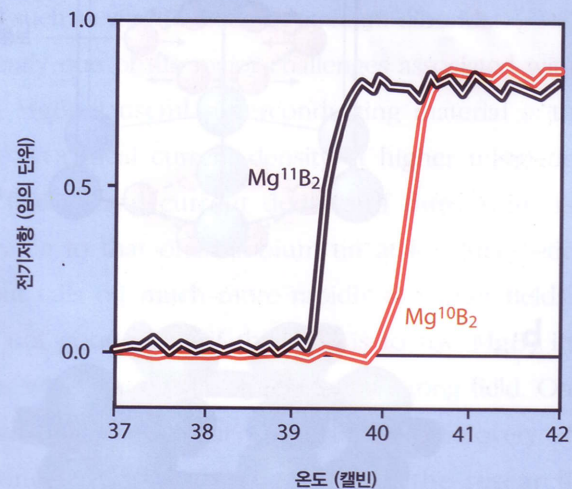
Cooper 쌍으로 알려진 전자쌍의 구조가 궁극적으로 초전도현상을 일으킨다. 하나의 전자가 지나가며 금속 안에 (왼쪽 그림) 있는 양이온들로 이루어진 격자 구조에 비틀림 현상을 일으킨다. 짧은 순간 후에 두 번째 전자가 비틀림에 의해 가까워진 양이온들에 의해 영향을 받아 당겨진다 (오른쪽 그림). 결과적으로 두 전자들이 서로를 약하게 잡아당기게 된다.

1957년 John Bardeen, Leon N. Cooper, Robert Schrieffer의 3인의 물리학자가 금속의 초전도체 현상에 대한 이론적 원리를 제시하였다. 상온에서 일반적인 비초전도체 금속에서는 전자들이 불완전하게 움직이며 저항을 발생시킨다. BCS이론에 따르면 초전도체현상에서는 전자들이 흩어짐이 없이 하나의 모여 있는 입자처럼 움직이는 현상이 일어난다. 이 새로운 전자상태의 기본은 Cooper 쌍이라 불리는 전자쌍인데 이들은 서로를 약하게 잡아당긴다. 두 개의 동일하게 대전된 입자사이에 일어나는 이러한 상호작용은 언뜻 보아서는 불가능하게 보인다. 하지만 금속은 전자들과 양이온들로 구성되어 있기 때문에 이러한 일이 가능하다. Cooper pair의 하나가 금속을 통해 이동할 때 양이온에 비틀림현상을 남긴다. 이 짧은 순간에 발생하는 순양전하는 두 번째 전자를 잡아당긴다. 이런 방식으로 격자 구조의 비틀림은 전자들은 느슨하게 연결한다. (좀 더 정확히 표현하면 특정한 진동수의 격자들의 진동이 결합에 영향을 미친다.) 넓게 비유하자면 커다란 트램펄린 (뽀글)에서 뛰어노는 두 아이와 비슷하다. 비록 아이들 사이에 직접적인 상호작용은 없지만 다른 아이가 발 아래 방수포에서 야기하는 비틀림 때문에 서로를 향해 뛰어 오르게 될 것이다.

Cooper 쌍들은 서로 겹쳐지고 임계 온도 ( $T_c$ ) 아래에서 더 이상 전기적인 저항이 전혀 없는 확장된 전자상태를 형성한다.

단순화된 BCS 이론의 임계온도가 물질의 세 가지 요소에 의존한다고 예측하고 있다. 즉 초전도 상태에 관여할 수 있는 전자들의 수 (더 많은 전자들이 관여할수록 임계온도는 더 올라감), 격

자 진동의 특성 진동수가 Cooper 쌍에서 전자들을 결합시키는 데 연관된 격자 진동의 특성 진동수 (더 큰 진동수를 가질수록 임계온도가 올라감), 격자의 비틀림과 전자들 사이의 결합력 (커플링이 더 강할수록 임계온도는 더 올라감)이 그것들이다. 수십년간 이 세 가지 요소들을 최적화하는 데 초점을 맞추어 (앞의 두 요소에 더 중점을 두고 있다) 더 높은 임계온도에서의 연구가 이루어지고 있다.  $MgB_2$ 는 세 번째 요소인 전자와 격자구조 간의 강한 결합력 때문에 높은 임계온도를 가지는 것으로 보인다.



임계 온도인 40K 이하로 온도가 내려가면  $MgB_2$ 의 전기 저항이 0이 된다. 임계온도는 순수 보론 10과 보론 11로 만들어진 시료에서 그 값이 다르다. 이 동위원소 전이는 BCS 이론에 의해 예측되므로,  $MgB_2$ 에서의 초전도 현상은 고전적인 BCS 초전도 유형이라 할 수 있다.



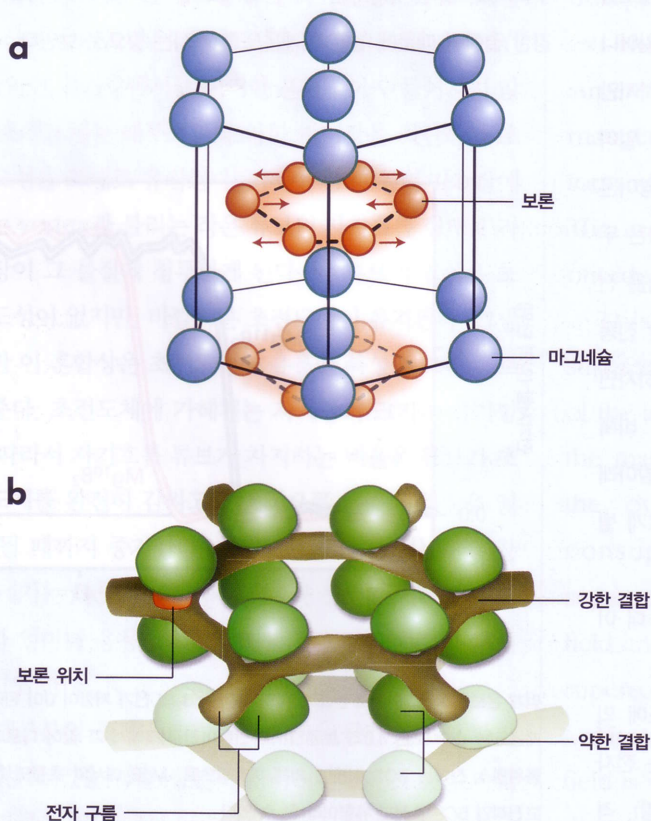
## 구조와 결합

MgB<sub>2</sub>의 놀랍게 높은 전이 온도의 주요한 원인 중의 하나는 특정한 전자들과 특정한 격자구조 진동사이의 강한 상호작용이다. 강한 상호작용은 물질의 구조와 결합 때문에 일어난다.

MgB<sub>2</sub>의 보론 원자는 육각형 벌집모양의 형태를 형성하고 있다 (그림 a, 빨간색 표시). MgB<sub>2</sub> 내의 이 층들은 마그네슘(파란색)의 층들에 의해 분리되어 진다. 통상적인 전기 전도도뿐 아니라 초전도성을 초래하는 전자들은 보론 층들과 연관이 있고, 그림 b에 보이듯이 물질 내의 두 가지 다른 결합형태 중 하나와 연관이 있다. 매우 강한 결합은 육각형 평면 내에서 일어나며 이보다 훨씬 약한 결합은 보론 층들 사이에서 일어난다.

평면 결합의 전도 전자들은 평면 위에 있는 격자구조의 진동(그림 a, 화살표)에 매우 강하게 영향을 받는다. 이 강한 상호작용 또는 결합이 높은 온도에서 초전도 현상이 유지되게 한다.

MgB<sub>2</sub>는 매우 흥미로운 기본적인 물리적 의문을 새로이 제기했다. 어느 초전도체가 두 개의 다른 Cooper 쌍의 바다를 형성하고 있는 두 개의 (녹색과 금색) 다른 전자 집단들이 관여하는 초전도현상을 가지는 것은 가능할까? 실험적 증거에 의하면 MgB<sub>2</sub>가 이러한 현상의 첫 번째 분명한 예가 될 듯하다.



magnetic fields in which the superconducting mixed phase survives. Temperature also plays a role in these considerations because the upper critical field of a superconductor varies with temperature. Just below  $T_c$ , the upper critical field is close to zero - that is, even the weakest field destroys the superconductivity. At lower temperatures the superconductivity can resist stronger fields [see box on page 91].

Fortunately, the upper critical field of a material can be tuned by making the compound in differing ways, generally by adding certain impurities. For example, when some carbon is substituted for boron in MgB<sub>2</sub>, the upper critical field is dramatically improved. Our group and others have shown that for about a 5 percent substitution of carbon, the upper critical field of MgB<sub>2</sub> can be more than doubled - a fantastic and important improvement in bulk samples.

In addition, the group of David C. Larbalestier at the University of Wisconsin-Madison has shown that thin films of MgB<sub>2</sub> have even higher values of the upper critical field, well above those of triniobium tin (Nb<sub>3</sub>Sn). The thin-film data present a vital mystery: What is giving rise to the high values? Is it small amounts of oxygen? Is it some other element sneaking in and doping in unknown ways? Is it strain in the structure of the MgB<sub>2</sub> in the films? Whatever the answers to



것이 된다. 초전도체의 위쪽 임계 자기장은 온도에 따라 변하므로 이러한 고려에서 온도는 또 중요하다. Tc 바로 아래에서 임계 자기장은 거의 0에 가깝다. 즉, 아주 약한 자기장일지라도 초전도체를 쉽게 파괴할 수 있다. 더 낮은 온도에서는 초전도체는 더 강한 자기장을 견딜 수 있다 [91쪽 상자글 참고].

다행히도 물질의 위쪽 임계 자기장은 다양한 방법, 주로 불순물을 첨가하는 방법을 사용하여 조절할 수 있다. 예를 들어,  $MgB_2$ 의 붕소 대신에 탄소를 치환시키면 임계 자기장은 극적으로 증가한다. 우리와 또 다른 연구팀은 5%의 탄소 치환을 통해서  $MgB_2$ 의 임계 자기장이 2배 이상 높아질 수 있음을 보였는데, 이는 벌크 시료에 있어 중요한 개선이다.

또한, Wisconsin-Madison 대학의 David C. Larbalestier의 연구팀은  $MgB_2$  박막은 기존의 니오븀 주석 ( $Nb_3Sn$ )보다 훨씬 높은 위쪽 임계 자기장의 값을 갖는다는 것을 입증하였다. 이러한 박막 실험결과는 중요한 의문점을 제기한다. 이 높은 값들이 어디서 오는가? 소량의 산소인가? 우리가 모르게 스며들어 도핑시키는 다른 원소인가?  $MgB_2$  박막 구조상의 변형인가? 이러한 질문의 답이 무엇이든지 간에 확실히  $MgB_2$ 는 니오븀 주석보다 더 높은 온도, 더 강한 자기장에서 작동할 수 있는 유용한 물질이다.

응용 물리학에서 특히 관심이 있는 두 번째 초전도 특성은 임계 전류밀도이다. 임계 전류밀도란 초전도체가 저항값을 0으로 유지하면서 흘려보낼 수 있는 전류량의 최대값을 일컫는다. 임계 전류밀도보다 더 높은 전류밀도에 대해서는 vortex (물질에서 초전도성이 없는 작은 영역들)가 이동하기 시작한다. 이 부분이 움직이기 시작하면 에너지 손실이 발생하게 되는데 이것은 물질의 저항이 더 이상 0이 아님을 의미한다. 이 효과를 저지하기 위해 초전도체 내에 적절한 결함을 도입하여 vortex를 고정 시킬 수 ("못질"할 수) 있다. 종종 보텍스 고정은 초전도 물질의 각각의 소결정 (또는 입자)을 더 작게 만들어 보텍스가 고정되는 입자경계 면적을 증가 시킴으로써 증가시킬 수 있다. 보텍스 고정을 증가시키는 또 다른 방법은 이트륨 (yttrium) 산화물이나 티타늄 다이보라이드 (titanium diboride)와 같은 다른 물질

those questions, clearly  $MgB_2$  is a promising material for superconducting magnets that can function at higher temperatures and possibly even in higher fields than triniobium tin, which is currently the preferred compound for such magnets.

The second superconducting property of particular interest for applied physics is the critical current density. This quantity delineates the maximum amount of current that a superconductor can carry and still maintain zero resistance. For current densities above the critical current density, the vortices (the small nonsuperconducting regions of the sample) start to slip or move. Once these regions start moving, energy losses occur - that is, the material has a nonzero resistance. To counter this effect, the vortices can be pinned (in essence, nailed down) by introducing the right type of defect into the superconductor. Often the vortex pinning can be increased by making the individual crystallites (or grains) of the material smaller, thus increasing the surface area associated with grain boundaries, where vortices get pinned. Another method of increasing vortex pinning involves adding microscopic inclusions of some second material such as yttrium oxide or titanium diboride.

Currently one of the major challenges associated with making  $MgB_2$  a useful superconducting material is to increase its critical current density at higher magnetic fields. The critical current density of pure  $MgB_2$  is comparable to that of triniobium tin at low magnetic fields but falls off much more rapidly at higher fields. This is not good news if the goal is to use  $MgB_2$  in magnets, which are meant to produce a strong field. On the other hand, in the four years since the discovery of superconductivity in this compound, the research community has made considerable improvements in critical current density, both in the low-field value and, perhaps more important, in the higher-field values. Research in this area is very active, and it appears that physicists will soon make further improvements and



을 소량 주입시키는 것이다.

현재  $MgB_2$ 가 아주 유용한 초전도 물질로 만드는 것과 연관된 중요한 도전 과제는 높은 자기장에서 임계 전류밀도를 증가시키는 일이다. 순수한  $MgB_2$ 의 임계 전류밀도는 낮은 자기장에서는 니오븀 주석과 비슷하지만 자기장이 더 높아지면 이는 급격히 감소하게 된

achieve a better understanding of what will provide a good pinning site in  $MgB_2$ .

### Past, Present and Future

the discovery of superconductivity in  $MgB_2$  is simultaneously the fruition of decades of focused

**낮은 자기장에서의 임계 전류 밀도와 어쩌면 더 중요할지도 모를 더 높은 자기장에서의 임계 전류밀도에서 상당한 진전을 이루었다. 이 분야에 관한 연구는 매우 활발하므로 물리학자들은 곧 더 많은 진전을 이룩하고, 무엇이  $MgB_2$ 에서 좋은 고정점을 제공할 것인가에 대하여도 이해할 수 있을 것으로 보인다.**

다. 만일 우리의 목표가  $MgB_2$ 를 자석으로 사용하는 것이라면 이는 결코 좋은 소식이 아니다. 하지만 이 물질에서 초전도성을 발견한 이후 4년 동안 학계에서는 낮은 자기장에서의 임계 전류 밀도와 어쩌면 더 중요할지도 모를 더 높은 자기장에서의 임계 전류밀도에서 상당한 진전을 이루었다. 이 분야에 관한 연구는 매우 활발하므로 물리학자들은 곧 더 많은 진전을 이룩하고, 무엇이  $MgB_2$ 에서 좋은 고정점을 제공할 것인가에 대하여도 이해할 수 있을 것으로 보인다.

### 과거, 현재 그리고 미래

$MgB_2$ 에서의 초전도성의 발견은 수 십년에 걸친 집중적인 연구의 결실인 동시에 우리가 자연을 기술하려고 헛되이 만들어내는 경험법칙이 늘 맞지 않는다는 것을 일깨워주는 극적인 사례이다.  $MgB_2$ 가 알려진 지 약 50년이나 되었지만 그 초전도성은 조사된 적이 없었는데, 이는 부분적으로는 금속간초전도체에 관한 우리의 일반적인 이미지와는 맞지 않았기 때문이다. 하지만 새로운 물질과 성질에 관한 연구를 통해서 이러한 편견의 소음들 사이로 자연의 목소리를 운 좋게 들을 수 있다.

지난 4년 동안 인류의  $MgB_2$ 의 초전도성에 관한 이해는 엄청난 속도로 발전했다. 우리는 고순도  $MgB_2$ 의 성질들을 확실히 이해하게 되었고, 쓸모 있는 영역의 전기장과 전류밀도를 얻기 위하여 이 물질을 변형시키는 방법도 알게 되었다. 20~30K에서의 특성이 개선되어서 이제 액체 질소나 액화 네온과 같은 냉매나 폐

research and a stark reminder that nature does not always heed the rules of thumb we make up in our often vain attempts to describe her. Although  $MgB_2$  was known to exist for about 50 years, it was never tested for superconductivity, partly because it did not fit our image of a likely intermetallic superconductor. Luckily, in the search for new materials and properties, nature's voice can still be heard over the din of our prejudices.

Over the past four years, humankind's understanding of superconductivity in  $MgB_2$  has evolved at breakneck speed. We have a clear idea of the properties of high-purity  $MgB_2$ , and we are learning how to modify the material so as to improve the ranges of magnetic field and current density over which it can be useful. The properties at 20 to 30 K have improved to the point that it appears high-current-density applications, such as magnets, can be made to operate either with cryogens such as liquid hydrogen or liquid neon or with closed-cycle refrigerators. Prototype coated wires and even some initial magnets have been made, but more work is needed to optimize the superconductor's properties and to understand its metallurgy as well as that of possible wire-coating materials.

On the whole, the future for  $MgB_2$  looks quite promising. Indeed, if a shift toward a hydrogen-based economy occurs, then  $MgB_2$  could truly come into its



쇄형 냉동기를 써서 고전류밀도 자석에 응용할 수 있을 것으로 보인다. 코팅된 전선 견본들과 심지어는 초기 형태 자석들까지 만들어졌지만, 초전도체의 성질들을 최적화하고,  $MgB_2$  및 전선 코팅으로 사용 가능한 물질들의 야금술을 이해하기 위해서는 더 많은 연구가 필요하다.

전체적으로는  $MgB_2$ 의 전망은 꽤 희망적으로 보인다. 실제로, 만일 수소를 기반으로 한 경제체제로 전환되면  $MgB_2$ 가 확실히 제자리를 찾을 수 있을 것으로 보인다. 예를 들어 작은 조약돌밭 반응기 (small pebble-bed reactors)에서 수소의 대량 생산이 가능하게 된다면 (James A. Lake, Ralph G. Bennett, John F. Kotek의 “차세대 원자력 발전” <사이언스올제> 2002년 2월호 참고), 수소는 어떤 방식으로든 수송되어야 할 것이다. 그 중의 하나로 내부가 수소의 끓는 점인 20K 이하로 유지되는 절연된 액체 수송관을 통한 것이다. 이 관들은 열적으로 차단된 공간을 공유하는  $MgB_2$ 로 만들어진 무손실 케이블을 위한 저온장치 구실을 할 수 있을 것이다. 비록 이런 체계가 현재로는 현실적인 공학이라기보다는 공상과학소설같이 들릴지 모르지만 이는 진지한 연구대상으로 제안되었다.

구리산화물을 기본으로 한 초전도체의 발견 이후에 연구자들은 수십 가지의 다른 초전도성 구리산화물들을 발견해내었다. 그러나  $MgB_2$ 는 발견한지 4년이 지났지만, 비정상적인 높은 온도에서 초전도성질을 가지는 이와 관련된 다른 어떤 화합물도 발견해 내지 못했다. 산화물들에서의 초전도성을 발견한 것은 마치 완전히 새로운 어떤 대륙 (탐색할 넓은 영역을 가진)을 발견해 낸 것과 비슷하다고 할 수 있다. 반면에  $MgB_2$ 에서의 초전도성의 발견은 잘 조사된 군도를 탐색해서 어떤 외곽 섬을 발견한 것과 비슷하다고 할 수 있다. 우리는 이 발견이 마지막이 될지 혹은 또 다른 놀라운 어떤 것이 우리를 기다리고 있을지 알지 못한다. □

own. If large quantities of hydrogen are to be produced, for example, at small pebble-bed reactors [see “Next-Generation Nuclear Power,” by James A. Lake, Ralph G. Bennett and John F. Kotek; Scientific American, January 2002], the hydrogen will have to be transported in some manner. One way would be through insulated, liquid-carrying pipes that would maintain temperatures below hydrogen’s 20 K boiling point. These pipes could constitute the cryogenic system for lossless power cables made of  $MgB_2$  sharing the space inside the thermal insulation. Although such a system currently sounds more like science fiction than an engineering reality, it has been proposed for serious study.

After the discovery of the first copper oxide-based superconductor, researchers found scores of other superconducting copper oxides. Yet four years after the discovery of  $MgB_2$ , no other related compounds have been found to have anomalously high  $T_c$  values. The discovery of superconductivity in the oxides was akin to discovering a whole new continent (with wide expanses to be explored). The discovery of superconductivity in  $MgB_2$ , on the other hand, was more like the discovery of an outlying island in a well-explored archipelago. We do not know if this is the final member of the chain or if yet another surprise awaits us out there.

#### 참고문헌

- **Superconductivity at 39 K in Magnesium Diboride.** Jun Nagamatsu et al. in *Nature*, Vol. 410, pages 63–64; March 1, 2001.
- **Magnesium Diboride: One Year On.** Paul C. Canfield and Sergey L. Bud'ko in *Physics World*, Vol. 15, No. 1, pages 29–34; January 2002.
- **Energy for the City of the Future.** Paul M. Grant in *Industrial Physicist*, Vol. 8, No. 1, pages 22–25; February/March 2002. Available at [www.aip.org/tip/INPHFA/vol-8/iss-1/p22.pdf](http://www.aip.org/tip/INPHFA/vol-8/iss-1/p22.pdf)
- **Magnesium Diboride: Better Late than Never.** Paul C. Canfield and George W. Crabtree in *Physics Today*, Vol. 56, No. 3, pages 34–40; March 2003.
- **Superconductivity in  $MgB_2$ : Electrons, Phonons and Vortices.** Edited by Wai Kwok, George W. Crabtree, Sergey L. Bud'ko and Paul C. Canfield. *Physica C*, Vol. 385, Nos. 1–2; March 2003.